

姜霞,苏春花,伍生磊,等.盐肤木不同生育期光合特性及其与主要环境因子的关系[J].江苏农业科学,2019,47(19):155-160.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.037

# 盐肤木不同生育期光合特性及其与主要环境因子的关系

姜霞<sup>1</sup>,苏春花<sup>2</sup>,伍生磊<sup>2</sup>,张喜<sup>1</sup>

(1. 贵州省林业科学研究院,贵州贵阳 550005; 2. 贵州民族大学化学与环境科学学院,贵州贵阳 550025)

**摘要:**为了研究白云质砂石山地区生物质能源树种盐肤木在不同生育期的光合特性及其与生理生态因子之间的关系,利用 Li-6400xt 便携式光合作用系统,测定盐肤木净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )等生理因子及空气湿度( $RH$ )、大气二氧化碳浓度( $C_a$ )、光合有效辐射( $PAR$ )和大气温度( $T_a$ )等生态因子,对不同生育期盐肤木光合日变化、光响应曲线进行了研究。运用相关分析、通径分析、决策系数分析及灰色关联分析,分析了在不同生育期盐肤木净光合速率  $P_n$  的日变化特征及其与生态因子和生理因子间的关系。结果表明,不同生育期盐肤木  $P_n$  日变化均呈单峰型;不同生育期盐肤木  $P_n$  表现为 8 月 > 5 月 > 10 月;不同生育期盐肤木的光饱和点( $LSP$ )表现为 8 月 > 5 月 > 10 月,差异显著;不同生育期盐肤木光补偿点( $LCP$ )表现为 8 月 ≈ 10 月 > 5 月,差异不显著;不同生育期盐肤木  $P_n$  的变化主要受  $G_s$ 、 $PAR$  和  $T_a$  的影响,同时还受其他生理生态因子的综合影响。

**关键词:**光合特性;灰色关联分析;盐肤木;生理生态因子;通径分析;决策系数;光响应曲线

**中图分类号:**S718.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)19-0155-06

贵州是一个强烈喀斯特化的亚热带高原山区,喀斯特区土壤贫瘠,水土流失严重,人地矛盾尖锐,“喀斯特贫困”现象严重,从而使喀斯特地区生产力逐渐降低,石漠化现象日益严峻<sup>[1]</sup>。生物质能源作为一种可再生能源将成为全球未来的主要能源之一,2010 年全球能源消耗已经达到 540 EJ,比 1980 年增长了 80%,到 2025 年将比 2010 年增长 50%,预计 2030—2050 年化石燃料供应仍将满足 75% 的能源需求,这将会导致  $CO_2$  浓度显著增加<sup>[2]</sup>。国内外对黄连木、麻风树等能源树种进行了研究<sup>[3-4]</sup>。生物质能源树种在山区储量巨大,是山区生物质能源开发的主体原料,也是实现能源可持续发展的一条重要途径<sup>[5]</sup>。贵州省人均耕地不到 0.1  $hm^2$ ,粮食只能自给,但有近 58 万  $hm^2$  宜林地资源为发展木本能源树种提供了广阔的空间,广泛分布的有乌桕、光皮树、黄连木、山桐子等木本生物质能源树种<sup>[6]</sup>。

盐肤木(*Rhus chinensis* Mill)为漆树科(Anacardiaceae)盐肤木属[*Rhus* (Tourn.) L. emend. Moench] 落叶小乔木,是林业生物质能源主要树种之一,也是我国主要经济树种,主要用于生产中药原料五倍子。其适应性强,对土壤要求不严,在中性土、酸性土、石灰性土壤上均可生长。种子含油率约 14%,

主要作为生物化工基础材料、生物柴油等。2017 年国家林业局印发《林业生物质能源主要树种目录(第一批)》,列出林业生物质能源主要树种目录 102 种,如盐肤木、油棕、野核桃等。目前国内有关盐肤木的研究报道主要集中在盐肤木生物学特性、五倍子培育、野生林的改造、种子育苗、栽培以及病虫害防治等方面。如陈存武等对盐肤木果实常规营养成分进行了分析<sup>[7]</sup>;王岚等则对盐肤木生物质炼制工程进行了研究,形成了盐肤木果油、生物柴油、蛋白饲料、黄酮、本色面巾纸、酚醛树脂、生物质成型燃料、沼气八大产品的盐肤木生物质炼制技术体系和生态产业链集成<sup>[8]</sup>;施翔等对盐肤木幼苗对铅胁迫的生理响应进行了研究<sup>[9]</sup>。目前,对盐肤木净光合速率与生态因子和生理因子关系的研究鲜有报道。因此,本研究以气象数据和植物生理数据为基础,对白云质砂石山地区天然盐肤木的净光合速率与生态、生理因子的关系进行相关性、通径、决策系数及灰色关联分析,以期为深入揭示其生理特征及栽培提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

凯里市位于贵州省东南部、苗岭山脉东段北麓,地处 26°24'13"~26°48'11"N、107°41'13"~108°12'19"E。该地区属中亚热带温暖湿润季风气候区,植被是中亚热带常绿阔叶林,且属于我国中亚热带东部湿润常绿阔叶林。1 月均温 5.2  $^{\circ}C$ ,7 月均温 25.8  $^{\circ}C$ ,平均气温 16.2  $^{\circ}C$ ,海拔 532~1 447 m,年日照时数 1 289 h,太阳辐射量 88.29  $kJ/cm^2$ ,年降水量 1 240.4 mm,年均相对湿度 78%,无霜期 288 d。

试验区位于凯里市东北部小河小流域下游的凯棠乡凯哨村,属清水江流域支流,区内河流切割显著,相对高差较大,为

收稿日期:2018-07-20

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC0502605);贵州省科技厅项目(编号:黔科合 S 字[2007]1024);贵州省林业厅项目(编号:黔林科合[2017]15 号)。

作者简介:姜霞(1981—),女,重庆人,硕士,副研究员,主要从事森林生态学研究。E-mail:43644135@qq.com。

通信作者:张喜,博士,研究员,主要从事森林生态与石漠化治理研究。E-mail:1003434130@qq.com。

加劳-水寨岩溶槽谷中度-强度石漠化综合治理小区(Ⅲ1)。小流域白云岩分布普遍,石漠化潜在威胁较为严重。试验区海拔 550~650 m,坡度 10°~25°,坡向西南,岩石裸露率低,土层厚度 10~30 cm、平均 15 cm 左右,土壤石砾量高、肥力低<sup>[10]</sup>。灌木植物盖度为 5%~20%,主要为槐蓝(*Indigofera tinctora*)、细叶铁子(*Myrsine* sp.)、地瓜藤(*Ficus oligodon*)等。草本盖度大于 90%,主要为拟金茅(*Eulaliopsis binata*)、牛耳朵(*Chirita edurnea*)等。小河小流域是典型的白云岩丘陵石漠区,植被恢复困难。

## 1.2 试验材料

选择天然盐肤木 3 株,苗高 1.5 m 左右,地径 2.0 cm 左右。选取植株外围上部健康成熟的叶片,采用叶片养分速测仪(TYS-3N)测定植物叶片叶绿素和氮素的含量,取平均值作为该叶片的相对叶绿素含量和氮素含量。选取成熟度相近(即叶绿素含量和氮素含量相近)的叶片作为待测定叶,测定植株叶片养分情况见表 1。

表 1 盐肤木叶片养分情况

月份	相对叶绿素含量 (SPAD 值)	氮素含量 (μg/g)
5 月	37.00 ± 0.74	3.15 ± 0.06
8 月	38.28 ± 1.38	3.20 ± 0.10
10 月	37.55 ± 0.79	3.20 ± 0.05

注:数据为平均值 ± 标准误差。

## 1.3 研究方法

1.3.1 光合日变化 光合日变化试验于 2017 年 5 月、8 月和 10 月于晴朗少云天气下进行。采用 LI-6400xt 便携式光合作用测定仪完成各项光合生理指标测定,每次测定 3 张样叶,每个样叶重复 3 次。主要测定参数包括光合生理因子:净光合速率 $[P_n, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、蒸腾速率 $[T_r, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、胞间  $\text{CO}_2$  浓度 $[C_i, \mu\text{mol}/\text{mol}]$ 、气孔导度 $[G_s, \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 等;生态因子:光合有效辐射 $[PAR, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、空气相对湿度 $(RH, \%)$ 、空气温度 $(T_a, ^\circ\text{C})$ 、大气  $\text{CO}_2$  浓度 $[C_a, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 等,测定时间段为 08:00—18:00,每隔 2 h 测定光合日变化。

1.3.2 光响应测定 光响应曲线的测定以测定光合日变化的植株为对象。使用 LI-6400xt-02B 红蓝光源,测定时设定叶片温度 25 °C,相对湿度 70% 左右,  $\text{CO}_2$  浓度 380  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。设置光强 2 000、1 500、1 000、500、250、120、60、30、15、0  $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  测量光合生理生态因子的变化,间隔时间 3 min,获得一系列数据点,由光合助手软件拟合绘制净光合速率与光合有效辐射响应曲线<sup>[11]</sup>。根据拟合曲线计算出光补偿点、光饱和点、表观量子效率、最大净光合速度、暗呼吸速率等光合参数。

1.3.3 通径分析 通径分析是在多元回归的基础上将相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数<sup>[12]</sup>。

1.3.4 决策系数分析 决策系数的计算公式如下:

$$R_{(i)}^2 = 2P_i r_{iy} - P_i^2$$

式中: $R_{(i)}^2$  为自变量  $i$  的决策系数; $P_i$  为自变量  $i$  的直接通径系数; $r_{iy}$  为自变量  $i$  与因变量  $y$  的相关系数。决策系数最大的值为主要决策变量,而决策系数小且为负值的为主要限制

变量<sup>[13]</sup>。

1.3.5 灰色关联分析 灰色关联分析是以各因素的样本数据为依据,用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序。

设  $X_1, X_2, \dots, X_N$  为  $N$  个因素,反映各因素变化特征的数据列分别为  $\{X_1(t)\}, \{X_2(t)\}, \dots, \{X_M(t)\}, t = 1, 2, \dots, M$ 。因素  $X_j$  对  $X_i$  的关联系数定义为

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t) + k\Delta_{\max}}, t = 1, 2, 3, \dots, M。$$

式中: $\xi_{ij}(t)$  为因素  $X_j$  对  $X_i$  在  $t$  时刻的关联系数; $\Delta_{ij}(t) = |X_i(t) - X_j(t)|$ ,  $\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$  分别表示  $\Delta_{ij}(t)$  的最大值和最小值; $k$  为  $[0, 1]$  区间上的灰数(分辨系数)。

在实际运用中,  $X_j$  对  $X_i$  的关联度近似计算公式为<sup>[14]</sup>

$$r_{ij} \approx \frac{1}{M} \sum_{t=1}^N \xi_{ij}(t)。$$

对灰色关联度从大到小排序,关联度越大表明该因子对被影响因子的影响越大。

## 1.4 数据处理

试验数据均采用各指标的平均值。对所取得的数据应用 DPS2000 软件进行了相关性分析、通径分析、生态因子和生理因子与盐肤木光合速率之间的灰色关联分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育期盐肤木净光合速率日变化

图 1 表明,不同生育期盐肤木净光合速率( $P_n$ )均呈单峰型,5 月、10 月峰值出现在 10:00,  $P_n$  分别为 12.49、5.80  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 8 月峰值出现在 12:00,  $P_n$  为 11.05  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,其峰值大小为 5 月 > 8 月 > 10 月。峰值后,随着光合有效辐射增强,气温不断升高,高温、强辐射造成气孔部分关闭,气孔导度降低,避免了大量的水分损失,同时气孔部分关闭使  $\text{CO}_2$  吸收量减少,导致光合速率也降低。从日均值来看,不同生育期盐肤木净光合速率表现为 8 月  $[7.70 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > 5$  月  $[7.11 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > 10$  月  $[3.95 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 。

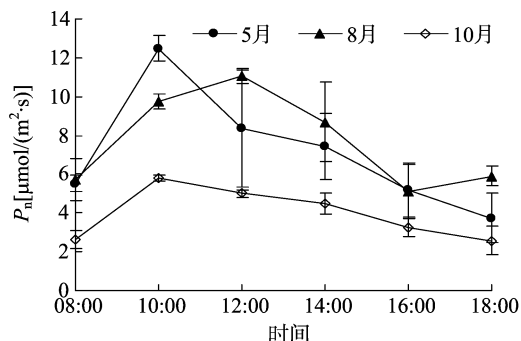


图 1 不同生育期盐肤木叶片净光合速率日变化

### 2.2 不同生育期盐肤木蒸腾速率日变化

图 2 表明,3 个月份盐肤木蒸腾速率( $T_r$ )均呈单峰型,未出现蒸腾“午休”。5 月、8 月与 10 月峰值均出现在 14:00,分别 4.07、4.73、2.55  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。从日均值来看,不同月份盐肤木  $T_r$  表现为 8 月  $[3.22 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > 5$  月  $[2.36 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > 10$  月  $[1.87 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 。

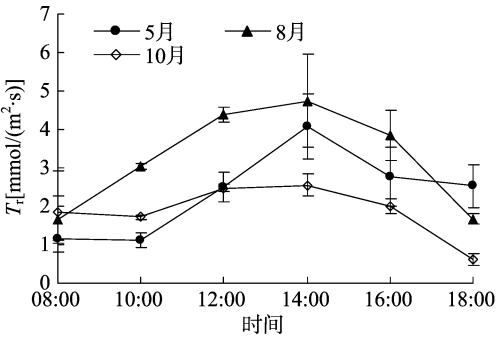


图2 不同生育期盐肤木叶片蒸腾速率日变化

2.3 盐肤木净光合速率与生态因子及生理因子的相关性分析

不同生育期盐肤木净光合速率与生理生态因子的测定结果见表 2,对净光合速率与生理生态因子进行简单相关关系,相关系数见表 3。由表 3 可知,5 月盐肤木净光合速率( $P_n$ )与气孔导度( $G_s$ )和空气相对湿度( $RH$ )关系密切,其中与气孔导度( $G_s$ )在 0.01 水平上极显著正相关,相关系数为 0.73;与空气相对湿度( $RH$ )在 0.05 水平上呈显著正相关,相关系数为 0.55。8 月盐肤木净光合速率( $P_n$ )与气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和光合有效辐射( $PAR$ )关系密切,其中与气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )在 0.01 水平上极显著正相关,相关系数分别为 0.66 和 0.72;与光合有效辐射( $PAR$ )在 0.05 水平上呈显著正相关,相关系数为 0.47。10 月盐肤木净光合速率( $P_n$ )与光合有效辐射( $PAR$ )在 0.01 水平上极显著正相关,相关系数为 0.59。

表 2 不同生育期盐肤木光合生理生态因子

月份	时间	$G_s$ [ $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$C_i$ ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	$T_r$ [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$T_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$C_a$ ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	$RH$ (%)	$PAR$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$P_n$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
5 月	08:00	0.17	317	1.15	25	383	76	213	5.52
	10:00	0.17	228	1.12	27	373	84	974	12.49
	12:00	0.21	303	2.50	33	386	79	1 428	8.36
	14:00	0.11	247	4.07	37	394	44	1 388	7.43
	16:00	0.07	247	2.78	36	391	42	1 054	5.15
	18:00	0.08	294	2.52	35	392	44	706	3.73
8 月	08:00	0.17	338	1.64	27	416	69	279	5.73
	10:00	0.18	290	3.05	32	406	59	1 473	9.75
	12:00	0.19	260	4.74	32	387	43	1 483	11.05
	14:00	0.13	245	4.74	36	396	38	1 641	8.70
	16:00	0.08	252	3.84	37	392	33	1 514	5.09
	18:00	0.10	267	1.67	29	385	56	495	5.89
10 月	08:00	0.17	378	1.86	29	447	60	121	2.60
	10:00	0.09	277	1.72	30	400	56	857	5.80
	12:00	0.09	287	2.47	34	386	47	1 270	4.22
	14:00	0.06	228	2.55	36	375	42	1 801	4.51
	16:00	0.06	272	2.00	35	382	39	262	3.27
	18:00	0.02	204	0.62	32	399	45	142	2.56

表 3 盐肤木净光合速率与生态因子及生理因子的相关系数

月份	与净光合速率的相关系数						
	$G_s$	$C_i$	$T_r$	$T_a$	$C_a$	$RH$	$PAR$
5 月	0.73 **	-0.44	0.12	-0.32	-0.12	0.55 *	0.28
8 月	0.66 **	-0.22	0.72 **	0.07	-0.11	0.01	0.47 *
10 月	0.13	-0.18	0.44	0.13	-0.39	0.13	0.59 **

注:“\*\*”表示在 0.01 水平(双侧)极显著相关;“\*”表示在 0.05 水平(双侧)显著相关。

2.4 盐肤木净光合速率与生态因子和生理因子的通径分析及决策系数分析

2.4.1 通径分析 不同生育期盐肤木净光合速率与生态因子和生理因子间的通径系数计算结果见表 4。5 月,各生态因子和生理因子对盐肤木  $P_n$  的直接作用中, $G_s$  的直接作用为 0.872,大于其他因子的直接作用,同时大于其他因子的间接作用,说明  $G_s$  对  $P_n$  有较大的促进作用; $C_i$  对盐肤木  $P_n$  的直接作用为负值(-0.672),大于通过其他因子的间接通径系数,说明  $C_i$  对盐肤木  $P_n$  的直接影响大于通过其他因子的间接影响; $C_a$  对  $P_n$  的直接作用为正值(0.043)和  $RH$  对  $P_n$  的直接作用为负值(-0.035),但在各因子相互影响下, $C_a$  和

$RH$  对  $P_n$  的相关系数发生了较大变化,说明各生理生态因子对  $P_n$  作用的复杂性。 $T_a$  对  $P_n$  的直接作用小于通过  $G_s$  的间接作用,因此  $T_a$  通过  $G_s$  的间接作用影响盐肤木的  $P_n$ , $T_r$  通过  $C_i$  间接作用对  $P_n$  进行作用, $PAR$  通过  $G_s$  和  $C_i$  对  $P_n$  进行作用, $RH$  通过  $C_i$  对  $P_n$  进行作用。

8 月, $T_r$  和  $PAR$  通过本身对盐肤木  $P_n$  进行作用,直接通径系数均为较大正值(分别为 0.972、0.681),说明  $T_r$  和  $PAR$  对盐肤木  $P_n$  的直接影响大于通过其他因子的间接影响; $RH$  通过  $T_a$  对  $P_n$  进行作用, $G_s$  通过  $C_i$  和  $PAR$  对  $P_n$  进行作用, $C_i$ 、 $C_a$  通过  $T_r$  和  $PAR$  对  $P_n$  进行作用。

10 月, $T_r$  和  $RH$  通过本身对盐肤木  $P_n$  进行作用,直接通

径系数均为较大正值(分别为 2.060、0.905),说明  $T_r$  和  $RH$  对盐肤木  $P_n$  的直接影响大于通过其他因子的间接影响; $C_i$  通过  $G_s$  和  $C_a$  对  $P_n$  进行作用, $RH$  通过  $T_a$  对  $P_n$  进行作用。

2.4.2 决策系数分析 由表 4 中决策系数可知,不同生育期影响盐肤木  $P_n$  的生态因子和生理因子决策系数排序:5 月为  $R^2_{(G_s)} > R^2_{(C_i)} > R^2_{(T_r)} > R^2_{(RH)} > R^2_{(PAR)} > R^2_{(C_a)} > R^2_{(T_a)}$ , $RH$  和  $C_a$  的决策系数为负值,为主要限制变量。8 月为  $R^2_{(T_r)} > R^2_{(T_a)} > R^2_{(PAR)} > R^2_{(RH)} > R^2_{(G_s)} > R^2_{(C_i)} > R^2_{(C_a)}$ , $G_s$ 、 $RH$  和  $T_a$  的决策系数为

负值,为主要限制变量;直接作用较大的  $RH$ (0.328)通过其他因子对  $P_n$  的间接作用为负,抵消了  $RH$  与  $P_n$  的相关系数,从而使  $RH$  的决策系数为负值(−0.101)。10 月为  $R^2_{(C_i)} > R^2_{(T_r)} > R^2_{(T_a)} > R^2_{(RH)} > R^2_{(PAR)} > R^2_{(G_s)} > R^2_{(C_a)}$ ,各决策系数均为负值,说明均起到限制作用;直接作用较大的  $T_r$  和  $RH$ (分别为 2.060 和 0.905)通过其他因子对  $P_n$  的间接作用为负,抵消了  $T_r$  和  $RH$  与  $P_n$  的相关系数,从而使  $T_r$  和  $RH$  的决策系数为负值,分别为 −2.430、−0.584。

表 4 不同生育期盐肤木净光合速率与生态因子和生理因子间的通径系数和决策系数

月份	生态生理因子	相关系数	直接作用	通径系数							决策系数
				$G_s$	$C_i$	$T_r$	$T_a$	$C_a$	$RH$	$PAR$	
5 月	$G_s$	0.73	0.872		−0.177	−0.001	0.067	−0.004	−0.026	0.004	0.513
	$C_i$	−0.44	−0.672	0.229		−0.008	0.028	0.004	−0.006	−0.014	0.140
	$T_r$	0.12	0.050	−0.018	0.111		−0.096	0.026	0.020	0.027	0.009
	$T_a$	−0.32	−0.130	−0.452	0.145	0.037		0.027	0.029	0.025	0.066
	$C_a$	−0.12	0.043	−0.073	−0.068	0.030	−0.080		0.022	0.001	−0.012
	$RH$	0.55	−0.035	0.659	−0.123	−0.028	0.108	−0.028		−0.006	−0.040
	$PAR$	0.28	0.046	0.070	0.206	0.029	−0.071	0.001	0.004		0.024
8 月	$G_s$	0.66	−0.022		−0.030	0.333	0.272	−0.006	0.134	−0.027	−0.029
	$C_i$	−0.22	−0.073	−0.009		−0.519	0.625	−0.022	0.259	−0.479	0.027
	$T_r$	0.72	0.972	−0.007	0.039		−0.580	0.009	−0.190	0.480	0.455
	$T_a$	0.07	−0.895	0.007	0.051	0.630		0.010	−0.290	0.559	−0.926
	$C_a$	−0.11	−0.029	−0.004	−0.054	−0.315	0.306		0.196	−0.212	0.006
	$RH$	0.01	0.328	−0.009	−0.058	−0.564	0.791	−0.017		−0.463	−0.101
	$PAR$	0.47	0.681	0.001	0.051	0.684	−0.735	0.009	−0.223		0.176
10 月	$G_s$	0.13	−1.581		−0.385	1.465	0.449	−0.397	0.552	0.023	−2.909
	$C_i$	−0.18	−0.586	−1.038		0.651	0.763	−0.695	0.635	0.089	−0.132
	$T_r$	0.44	2.060	−1.124	−0.185		−0.435	0.215	0.058	−0.146	−2.430
	$T_a$	0.13	−1.314	0.540	0.340	0.681		0.874	−0.813	−0.175	−2.067
	$C_a$	−0.39	−0.969	−0.647	−0.420	−0.456	1.185		0.742	0.179	−0.184
	$RH$	0.13	0.905	−0.964	−0.411	0.133	1.180	−0.795		0.077	−0.584
	$PAR$	0.59	−0.297	0.125	0.175	1.013	−0.777	0.584	−0.234		−0.438

2.5 盐肤木净光合速率与生态因子和生理因子的灰色关联分析

不同分辨系数下盐肤木净光合速率与生态因子和生理因子之间的灰色关联度和关联序列见表 5。5 月,当分辨系数为 0.1、0.3 与 0.5 时,盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联度的大小顺序均为  $G_s > RH > C_a > PAR > T_r > C_i > T_a$ ,说明不同的分辨系数对盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联序没有影响。8 月,当分辨系数为 0.1 与 0.3 时,盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联度的大小顺序均为  $G_s > T_r > PAR > C_a > RH > T_a > C_i$ ;当分辨系数为 0.5 时,盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联度的大小顺序均为  $G_s > T_r > PAR > C_a > T_a > RH > C_i$ 。综上所述,8 月当分辨系数为 0.1、0.3 与 0.5 时,对盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联序进行比较发现,不同的分辨系数对  $G_s$ 、 $T_r$ 、 $PAR$ 、 $C_a$ 、 $C_i$  的顺序没有影响,对  $T_a$  和  $RH$  的顺序稍有影响,但各因子的总体顺序是相似的,这说明分辨系数 k 具有取值的针对性和情况分析的复杂性。10 月,当分辨系数为 0.1 时,盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联度的大小顺序为  $G_s > T_r > PAR > T_a > RH > C_i > C_a$ ;当分辨系数为 0.3、0.5 时,盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联度的大小顺序为  $T_r > G_s > PAR > T_a >$

$RH > C_i > C_a$ 。综上所述,在 10 月,当分辨系数为 0.1、0.3 与 0.5 时,对盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联序进行比较发现,不同的分辨系数对  $PAR$ 、 $T_a$ 、 $RH$ 、 $C_i$ 、 $C_a$  的顺序没有影响,对  $G_s$  和  $T_r$  的顺序稍有影响,但各因子的总体顺序是相似的。

2.6 不同生育期盐肤木光响应曲线

由图 3 可知,不同生育期,当  $PAR$  低于 500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,  $P_n$  呈直线上升;5 月和 8 月,当  $PAR$  超过 500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,  $P_n$  增长趋于缓和,但仍在上升,没有光抑制现象;在 10 月,当  $PAR$  超过 1 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,但  $P_n$  随着  $PAR$  的增加呈下降趋势,出现光抑制现象。将盐肤木 3 个重复叶片光合有效辐射与净光合速率的数据导入光合助手软件直接拟合,获得的盐肤木在不同生育期的光响应参数(表 6)显示,不同生育期盐肤木的光饱和点( $LSP$ )表现为 8 月  $[937 \pm 73 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > 5 \text{ 月 } [684 \pm 27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > 10 \text{ 月 } [509 \pm 38 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ,差异显著;不同生育期盐肤木的光补偿点( $LCP$ )表现为 8 月  $[8.0 \pm 4.0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \approx 10 \text{ 月 } [8.0 \pm 0.0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > 5 \text{ 月 } [6.7 \pm 2.7 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ ,差异不显著;不同生育期盐肤木的最大净光合速率( $P_{\text{max}}$ )表现为 8 月  $[16.0 \pm 1.3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] > 5 \text{ 月 } [12.6 \pm$

1.4  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] > 10 月  $8.9 \pm 0.7 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ], 8 月、10 月间差异显著;不同生育期盐肤木的暗呼吸速率( $R_d$ )表现为 8 月  $[0.465 2 \pm 0.288 6 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  > 10 月  $[0.423 5 \pm 0.027 6 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  > 5 月  $[0.335 9 \pm 0.046 3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ , 差异不显著;不同生育期盐肤木的表观量子效率表现为 5 月  $[0.059 0 \pm 0.009 9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  > 8 月  $[0.057 0 \pm 0.002 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$  > 10 月  $[0.054 3 \pm 0.002 9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ , 差异不显著。

表 5 不同生育期盐肤木净光合速率与生态因子和生理因子的灰色关联分析

月份	生态因子和生理因子	分辨系数=0.1		分辨系数=0.3		分辨系数=0.5	
		关联度	关联序	关联度	关联序	关联度	关联序
5 月	$G_s$	0.471 8	1	0.696 4	1	0.784 6	1
	$C_i$	0.286 9	6	0.508 9	6	0.619 4	6
	$T_r$	0.331 1	5	0.561 8	5	0.669 6	5
	$T_a$	0.279 3	7	0.495 4	7	0.607 9	7
	$C_a$	0.416 5	3	0.607 5	3	0.697 2	3
	$RH$	0.418 4	2	0.648 1	2	0.743 6	2
	$PAR$	0.347 7	4	0.584 8	4	0.690 7	4
8 月	$G_s$	0.451 9	1	0.690 0	1	0.779 3	1
	$C_i$	0.279 2	7	0.487 7	7	0.596 2	7
	$T_r$	0.409 8	2	0.644 7	2	0.742 2	2
	$T_a$	0.321 4	6	0.538 4	6	0.643 9	5
	$C_a$	0.350 4	4	0.552 5	4	0.650 1	4
	$RH$	0.340 8	5	0.542 1	5	0.641 3	6
	$PAR$	0.357 3	3	0.590 7	3	0.693 8	3
10 月	$G_s$	0.466 3	1	0.677 5	2	0.763 0	2
	$C_i$	0.363 3	6	0.580 9	6	0.681 8	6
	$T_r$	0.450 4	2	0.678 4	1	0.767 5	1
	$T_a$	0.422 0	4	0.628 0	4	0.720 8	4
	$C_a$	0.314 7	7	0.540 3	7	0.649 1	7
	$RH$	0.384 9	5	0.616 8	5	0.715 7	5
	$PAR$	0.426 3	3	0.665 0	3	0.760 2	3

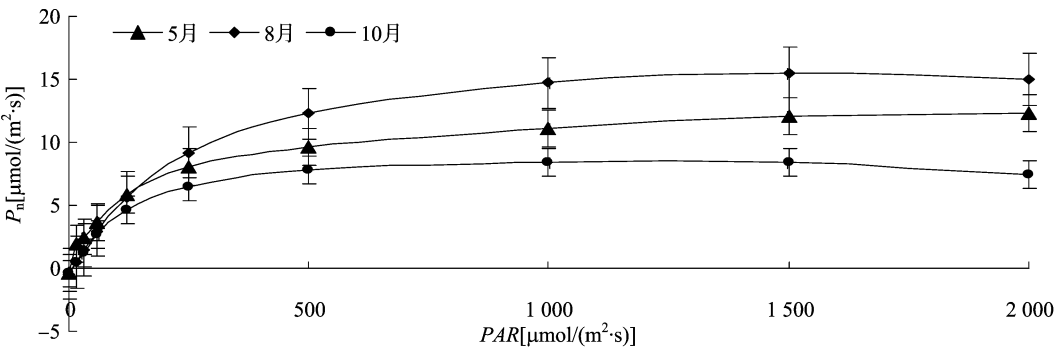


图3 盐肤木不同生育期的光响应曲线

表 6 盐肤木不同生育期的光响应参数

月份	光饱和点 $LSP$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	光补偿点 $LCP$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	最大净光合速率 $P_{n\max}$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	暗呼吸速率 $R_d$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	表观量子效率 $\alpha$
5 月	684 $\pm$ 27b	6.7 $\pm$ 0.7a	12.6 $\pm$ 1.4ab	0.336 $\pm$ 0.046a	0.059 0 $\pm$ 0.009 9a
8 月	937 $\pm$ 73a	8.0 $\pm$ 1.2a	16.0 $\pm$ 1.3a	0.465 $\pm$ 0.008a	0.057 0 $\pm$ 0.002 0a
10 月	509 $\pm$ 38c	8.0 $\pm$ 0.0a	8.9 $\pm$ 0.7b	0.424 $\pm$ 0.028a	0.054 3 $\pm$ 0.002 9a

注:同列不同小写字母表示不同生育期差异显著( $P < 0.05$ )。

3 结论与讨论

$P_n$  决定着植物物质积累能力的高低,在一定程度上也决定了植物生长的快慢<sup>[15]</sup>。研究表明不同生育期盐肤木净光合速率表现为 8 月 > 5 月 > 10 月,说明盐肤木在 8 月生长旺

季,净光合速率较大,有机物积累多,生长快;在 10 月,其净光合速率较小,物质积累少,生长较缓慢。光合作用受内部生理因子(叶龄、部位、生育期等)及外部环境因素(光、 $\text{CO}_2$ 、温度、水分等)共同影响,但在短时间内,由于内部生理因子相对稳定,外部环境因子就成为主要影响因素<sup>[16-17]</sup>。在白云质砂石

山地区,不同生育期盐肤木净光合速率和蒸腾速率均呈单峰型,没有明显的光合“午休”现象,说明在 8 月份生长旺季,盐肤木也不畏高温高光环境。马金娥在常态地貌下对天然生长盐肤木光合日变化进行研究发现,净光合速率呈光合“午休”现象,在 12:00 时到达最低<sup>[18]</sup>。结果表明,盐肤木的光合“午休”现象,不仅与生理因子有关,同时也受到环境因子的影响。

光对植物形态结构、生长发育和生理生化等方面具有重要作用,光照强度是影响植物光合作用的主导生态因子。对光能利用能力的高低是植物光合速率存在差异的重要原因,*LSP* 和 *LCP* 反应了植物对光照条件的要求,分别体现了对强光和弱光的利用能力<sup>[19]</sup>。不同生育期盐肤木的 *LSP* 表现为 8 月 > 5 月 > 10 月, *LCP* 表现为 8 月 ≈ 10 月 > 5 月。在 8 月,盐肤木 *LSP* 较高, *LCP* 较高,反映出盐肤木在 8 月对强光的利用能力增强,对弱光的利用能力也增强。表观量子效率  $\alpha$  是植物光合作用对光的利用效率,不同生育期盐肤木的表观量子效率表现为 5 月 > 8 月 > 10 月,以春季最高,表明其在春季对光能的利用效率高。

不同生育期盐肤木净光合速率与生态因子和生理因子间的通径分析可知,5 月  $G_s$  对盐肤木  $P_n$  直接作用为 0.872,大于其他因子的直接作用;8 月,  $T_r$  和  $PAR$  通过本身对盐肤木  $P_n$  进行作用,直接通径系数均为较大正值(分别为 0.972、0.681),说明  $T_r$  和  $PAR$  对盐肤木  $P_n$  的直接影响大于通过其他因子的间接影响;10 月,  $T_r$  和  $RH$  通过本身对盐肤木  $P_n$  进行作用,直接通径系数均为较大正值(分别为 2.060、0.905),说明  $T_r$  和  $RH$  对盐肤木  $P_n$  的直接影响大于通过其他因子的间接影响。

灰色关联分析表明,5 月,当分辨系数为 0.1、0.3、0.5 时,不同的分辨系数对盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联序没有影响。8 月,当分辨系数为 0.1、0.3、0.5 时,对盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联序进行比较发现,不同的分辨系数对  $G_s$ 、 $T_r$ 、 $PAR$ 、 $C_a$ 、 $C_i$  的顺序没有影响,对  $T_a$  和  $RH$  的顺序稍有影响,但各因子的总体顺序是相似的,这说明分辨系数  $k$  具有取值的针对性和情况分析的复杂性。10 月,当分辨系数为 0.1、0.3、0.5 时,对盐肤木  $P_n$  与生态因子和生理因子间关联序进行比较发现,不同的分辨系数对  $PAR$ 、 $T_a$ 、 $RH$ 、 $C_i$ 、 $C_a$  的顺序没有影响,对  $G_s$  和  $T_r$  的顺序稍有影响,但各因子的总体顺序是相似的。

综上所述,不同生育期盐肤木  $P_n$  的变化主要受  $G_s$ 、 $PAR$  和  $T_r$  的影响,但  $G_s$ 、 $PAR$  和  $T_r$  的影响不存在简单的线性相关关系,同时还受其他生理生态因子的综合影响。盐肤木对光的适应范围宽,对低光的捕捉能力较强,能有效利用林下弱光,有利于自然生长更新,同时对强光的利用率高,能有效进行物质积累。在贵州偏远贫困地区,土壤瘠薄,石漠化威胁严

重,农民难以依靠种植传统经济作物过活,如果能对盐肤木科学开发、合理利用,将会产生巨大的经济效益和社会效益,喀斯特地区农民可以依靠当地的地理情况合理开发野生植物资源,摆脱贫困,增产增收。

#### 参考文献:

- [1] 彭晚霞,王克林,宋同清,等. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J]. 生态学报,2008,28(2):811-820.
- [2] 曾淑珍,吴延旭,谢晓敏,等. 生物质能源树种的研究进展[J]. 经济林研究,2008,26(4):109-113.
- [3] 王涛. 中国主要生物质燃料油木本能源植物资源概况与展望[J]. 科技导报,2005,23(5):12-14.
- [4] 何文淑,肖荣贵,杨晓琼,等. 麻枫树在贫困地区农村发展和生态建设中[J]. 中国中医药信息杂志,2002,9(10):33-37.
- [5] 蒋建新,陈晓阳. 能源林与林木生物转化能源化研究进展[J]. 世界林业研究,2005,18(6):39-44.
- [6] 曹小飞. 贵州省木本生物质能源树种种质资源库建设必要性分析[J]. 内蒙古林业调查设计,2015,38(2):94-95.
- [7] 陈存武,张莉,何晓梅,等. 盐肤木果实常規营养成分分析[J]. 畜牧与饲料科学,2010,31(4):2-5.
- [8] 王岚,王宁,李坦,等. 盐肤木生物质炼制工程[J]. 生物工程学报,2014,30(5):695-706.
- [9] 施翔,王树凤,潘红伟,等. 盐肤木幼苗对铅胁迫的生理响应[J]. 林业科学研究,2016,29(1):147-153.
- [10] 伍铭凯,杨汉远,王定江,等. 凯里地区白云质砂石山主要植被类型调查[J]. 贵州林业科技,2009,37(2):28-31.
- [11] 姜霞,苏春花,伍生磊,等. 白云质砂石山地区翅荚香槐春季光合生理特性研究[J]. 广东农业科学,2017,44(9):41-47.
- [12] 敬艳辉,邢留伟. 通径分析及其应用[J]. 统计教育,2006(2):24-26.
- [13] 靳甜甜,傅伯杰,刘国华,等. 不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子[J]. 生态学报,2011,31(7):1783-1793.
- [14] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2002:338-341.
- [15] 郎校安,杨蕾蕾,崔铁成,等. 红花深山含笑光合速率日变化及其与环境因子的关系[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2017,37(4):22-27.
- [16] 郭连金,杜佳朋,吴艳萍,等. 香果树实生苗的光合特性及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2017,28(5):1473-1481.
- [17] 柏明娥,方建华,徐高福,等. 青钱柳光合作用日变化和光合响应特征[J]. 浙江林业科技,2016,36(1):1-5.
- [18] 马金娥,金则新,张文标. 濒危植物夏蜡梅及其伴生植物的光合日进程[J]. 植物研究,2007,27(6):708-714.
- [19] 王强,金则新,郭水良,等. 濒危植物长叶榧的光合生理生态特性[J]. 生态学报,2014,34(22):6460-6470.